

〈特集〉

移動発生源からのPM_{2.5}排出傾向

伊藤 晃 佳

(勸)日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部 (〒305-0822 つくば市苅間2530 E-mail: aito@jari.or.jp)

概要

移動発生源からのPM_{2.5}について、主に自動車からの排出に着目し、自動車排出ガス中のPM_{2.5}についての基礎的事項や近年の自動車排出ガス規制の推移、道路沿道でのPM_{2.5}実測、発生源寄与度解析手法としてのシミュレーション手法について概説する。また、自動車以外からのPM_{2.5}排出について、船舶、航空機、鉄道からの排出についての情報を示す。

キーワード：移動発生源、自動車排出ガス規制、元素状炭素 (EC)、PM_{2.5} 環境濃度、シミュレーション

原稿受付 2014.12.1

EICA: 19(4) 54-57

1. はじめに

平成25年(2013年)1月に、中国都市域における深刻な微小粒子状物質(PM_{2.5})汚染や国内への影響が報道などで大きく取り上げられ、それ以来、PM_{2.5}に対する国民の関心が大きく高まった。国内のPM_{2.5}濃度の大小に影響を及ぼす要因として、大陸からの越境輸送による汚染を真っ先に思い浮かべることが多いが、越境輸送のみならず国内での人為発生源による影響も依然として無視できないレベルであるとの報告もある¹⁾。このため、環境省では、平成25年(2013年)12月に、PM_{2.5}に関する総合的な取組(政策パッケージ)を公表し²⁾、この総合的な取組の基盤事業として、発生源情報の整備や大気モニタリングの充実、シミュレーションモデルの構築などが、現在進められている。

本稿では、PM_{2.5}発生源のうち移動発生源に着目し、主に自動車に由来するPM_{2.5}排出について取り上げる。まず、自動車排出ガスに含まれる粒子成分やこれらの測定方法など基本的事項についてまとめる。次いで、近年の自動車排出ガス規制の推移や、自動車排出ガスの影響を受けやすい道路沿道環境におけるPM_{2.5}濃度の現状や、シミュレーションを用いた発生源寄与度の推計について概観する。また、自動車以外の移動発生源として、船舶、航空機、鉄道からのPM_{2.5}排出についても、紹介する。

2. 自動車からのPM_{2.5}排出

2.1 自動車排出粒子の基礎的事項

(1) 自動車排出粒子の粒径と成分

自動車走行時に排出される粒子状物質は、発生源

別に、(1)燃料の燃焼に伴い排気管から排出される粒子状物質、(2)走行による巻き上げや摩耗により排出される粒子状物質の2つに分けることができる。以下では、便宜上、(1)を「自動車排出粒子」と定義する。自動車排出粒子は、主にディーゼル自動車から排出され、ガソリン自動車からの排出は相対的に少ない。**Fig. 1**は、自動車排出粒子の粒径について、質量濃度分布と数濃度分布の例を表している³⁾。**Fig. 1**に示すように、自動車排出粒子は、質量濃度で粒径0.1~0.3 μmにピークを持つ分布となっているため、PM_{2.5}の定義に照らし合わせると、自動車排出粒子は、ほとんどがPM_{2.5}からなる、とみなせる。

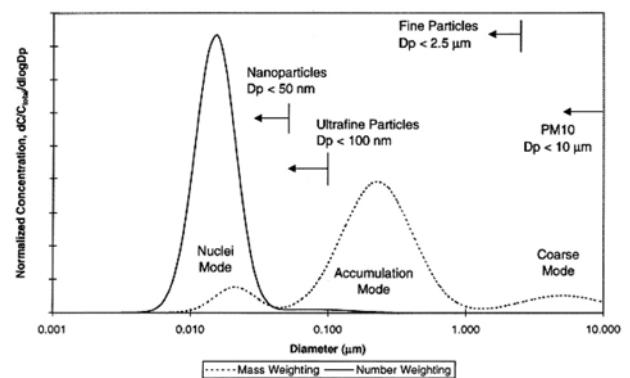


Fig. 1 Typical engine exhaust size distribution both mass and number, referred from Kittelson (1998)³⁾

また、自動車排出粒子に含まれる構成成分については、大部分が元素状炭素 (Elemental Carbon, EC) であり、その他、有機炭素 (Organic Carbon, OC)、サルフェートが含まれている^{4,5)}。EC と OC は、燃料や潤滑油中の炭素成分を由来として発生し、サルフェートは、燃料

や潤滑油中の硫黄成分を由来として発生する。

(2) 自動車排出粒子の測定方法

自動車排出ガス規制に伴う自動車排出粒子の測定方法は、道路運送車両の保安基準の細目を定める告示別添41および別添42において定義されている。この測定方法では、ある決められたパターンで走行する車両の排気を、希釈トンネルという設備において希釈用空気と混合・冷却し、自動車排出粒子を捕集フィルタ上にサンプリングする。捕集フィルタは、その後、秤量し、捕集前後のフィルタ重量の差により、粒子重量を求める。なお、この測定方法では、測定条件が細かく設定されており、指定の材質のフィルタを用い、試験室温度は、 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 、相対湿度は30~75%、秤量中の温度は、 $22 \pm 3^\circ\text{C}$ 、相対湿度は $45 \pm 8\%$ 、フィルタを通過する希釈排出ガスは 52°C 以下と設定されている。これらの条件は、大気中 $\text{PM}_{2.5}$ の測定条件とは必ずしも一致していないため、相互比較の際には注意が必要である。

2.2 自動車排出ガス規制の推移

国内の自動車排出ガス規制は、昭和41年(1966年)に最初に導入され、特に、1990年代以降、順次規制強化が行われてきた。Fig. 2は、ディーゼル重量車(12トン超)を例に、平成6年(1994年)以降のPM規制値の推移を表している。ディーゼル重量車については、平成6年(1994年)の短期規制以降、長期規制(平成11年)、新短期規制(平成16年)、新長期規制(平成17年)と規制強化が進み、平成21年(2009年)からはポスト新長期規制が導入された。

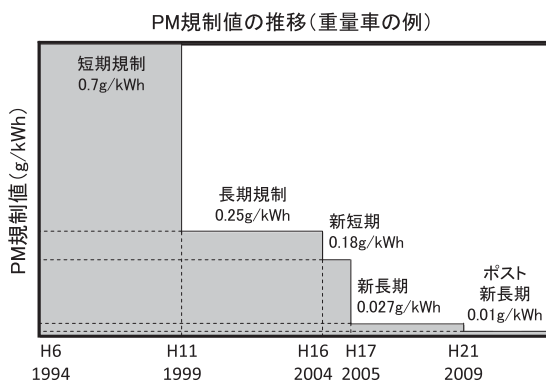


Fig. 2 Emission regulation of particulate matter for diesel heavy duty vehicles in Japan

このような自動車排出ガス規制の強化に対応するために技術開発が進められたが、自動車排出ガス中には、PMだけでなく窒素酸化物(NO_x)も多く含まれているため、これらを同時に低減するシステムが必要である。主な自動車排出ガス対策としては、燃焼の改善、燃料の改善、後処理装置の設置をあげることができる。

なかでも、自動車排出粒子の低減技術としては、後処理装置である酸化触媒やDPF(Diesel Particulate Filter)を設置する浄化システムが広く採用されている。また、燃料の改善については、PMの原因となりうる物質を除去するという一面もあるが、燃料中の硫黄含有量を低減させることで、後処理装置がより有効に機能するという一面もあり、自動車排出ガス対策として、燃料改善は欠かせない技術である。Fig. 3は、国内の軽油中に含まれる硫黄含有量の推移を表しているが、国内では、世界に先んじて、硫黄含有量の少ない自動車用燃料が製造・流通されている。

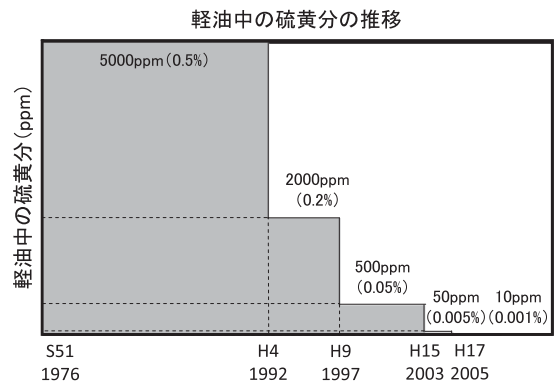


Fig. 3 Sulfur contents in diesel fuel in Japan

2.3 道路沿道環境における $\text{PM}_{2.5}$ 濃度

実際の道路沿道環境においては、現在走行中の車両が低公害車両に一気に置き換わるわけではなく、買い替えなどに伴う車両代替(自然代替)により、徐々に低公害車両の走行台数が増えていく。したがって、規制導入の効果が現れるまでには、若干のタイムラグがあるため、規制効果の確認のためにも、実際の大気環境、特に自動車排出ガスの影響を大きく受ける道路沿道における $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の推移や現況把握は重要である。

$\text{PM}_{2.5}$ 濃度の常時監視局は、全国的には、2009年度から設置・整備が開始されているが、東京都では、2000年代初頭から現在に至るまで、長期間に渡って継続的に $\text{PM}_{2.5}$ 観測を実施している。Fig. 4は、東京23区内の道路沿道(日光街道梅島)と一般環境(足立区綾瀬)で、2002年度から2013年度に測定された $\text{PM}_{2.5}$ 年平均濃度と、参考の為に、同じ期間における窒素酸化物(NO_x)年平均濃度の推移を表している⁶⁾。

これらの図より、 $\text{PM}_{2.5}$ も NO_x も経年的に濃度が低下していることが分かる。一般に、自動車排出ガスに含まれる成分は、一般環境に比べ道路沿道で濃度が高くなっており、この道路沿道と一般環境での濃度差を、自動車直接寄与濃度とよんでいる。 NO_x の自動車直接寄与濃度は、近年低下傾向が見られるものの、依然として大きな値となっているが、 $\text{PM}_{2.5}$ について

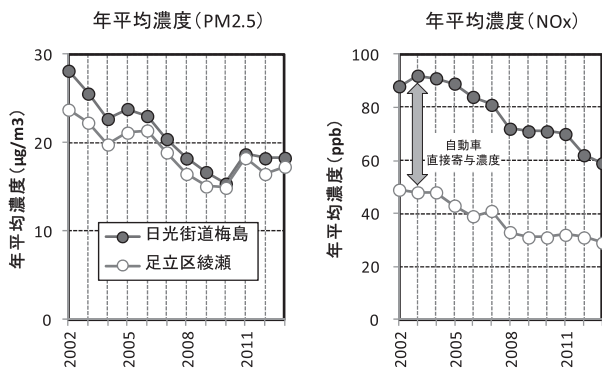


Fig. 4 Time series of annual mean concentrations of PM_{2.5} and nitrogen oxides at a roadside monitoring station (filled circle) and an ambient monitoring station (open circle) in Tokyo

は、2000年代前半に、 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度の自動車直接寄与濃度が見られたが、最近では、一般環境と道路沿道でほぼ同等の濃度となっていることがわかる。よって、自動車排出ガスの規制強化に伴い、自動車による直接的なPM_{2.5}の寄与が低下したことが考えられる。

Fig. 4では、PM_{2.5}重量濃度について確認したが、重量濃度のみならず、PM_{2.5}構成成分の濃度の推移も重要である。Fig. 5は、2000年代前半と2012年度に、国内の一般環境および道路沿道にて測定された、PM_{2.5}主要成分の平均濃度を表している^{7,8)}。なお、2000年代前半の測定は、環境省が、微小粒子状物質曝露影響調査の一環で行ったもので、全国の一般環境

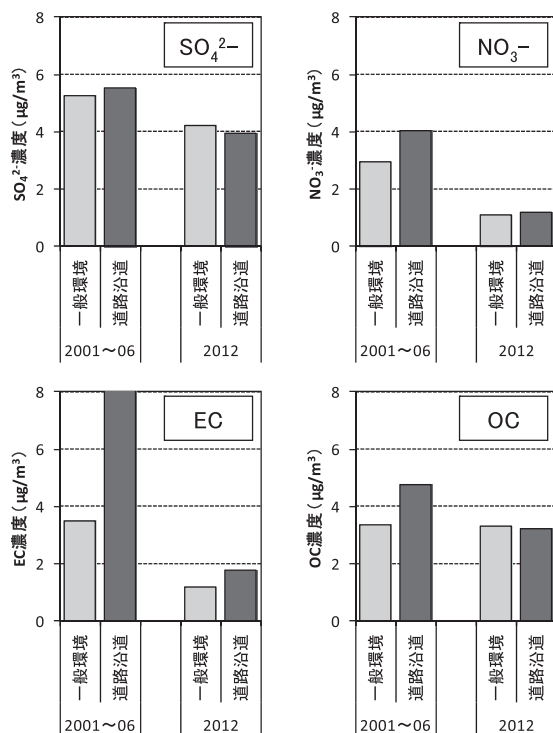


Fig. 5 Comparisons of mean concentrations of PM_{2.5} components (sulfate, nitrate, elemental carbon and organic carbon) in 2001~2006 and 2012

14ヶ所、道路沿道5ヶ所にて測定が実施された。2012年度の測定は、全国の自治体で実施されたもので、ここでは、一般環境52地点、道路沿道24地点での測定結果を平均している。

2000年代前半と2012年度では、測定場所や測定局数も一定ではなく、測定方法に関しても、この期間内に改善が進んでいることから、両者の結果を厳密に比較することは出来ないものの、傾向としては、2000年代前半と比べ、2012年度では、一般局・自排局共に、PM_{2.5}主要成分の濃度が低下しており、特に、道路沿道でのECの濃度低下は顕著に見られ、2012年度のSO₄²⁻、NO₃⁻、OCについては、一般環境と道路沿道の濃度差がほとんど無い。この結果からも、自動車からの直接的なPM_{2.5}の濃度上昇は、以前に比べ大きく低下していることが分かる。したがって、自動車排出ガス規制の強化に伴う排出量低減が、実際の大气環境の改善につながっていることが示唆される。

2.4 シミュレーションを用いた発生源寄与度解析

2.3節で、PM_{2.5}の自動車直接寄与濃度が大きく低下していることを述べたが、大气中での化学反応を経て生成される二次粒子については、その生成過程や発生源寄与を、常時監視などの測定結果から推定することは一般に困難である。よって、これらの大气中での挙動（大气汚染物質の発生、移流・拡散、化学反応、沈着）をコンピュータ上で再現したシミュレーションモデルを用いた発生源寄与度解析が有効であり、国内でも広く取り組まれている^{9,10)}。

ただし、シミュレーションモデルによるPM_{2.5}成分濃度の再現性については、OCで顕著な過小評価、NO₃⁻で過大評価の傾向にあり、この課題は国内の大气シミュレーション共通の課題となっており¹¹⁾、排出量推計や、化学反応スキームなどの改善が進められている。

2.5 自動車以外の移動発生源からのPM_{2.5}排出

(1) 船舶からのPM_{2.5}排出¹²⁾

船舶からのPM_{2.5}排出は、これまで規制対象とはなっていなかったが、平成18年度から、国際海事機関（International Marine Organization）において規制改訂議論が開始され、PMを新たな規制対象物質に追加し、SOx・PM規制として段階的に燃料中の硫黄分を削減することが合意された。よって、今後、排出量の低減が見込まれる。

東京都微小粒子状物質検討会¹³⁾では、平成20年度を対象年としたPM_{2.5}排出量の推計を行っており、東京湾内からのPM_{2.5}排出量が2,994 t/年、関東地方の外洋航路からの排出量が5,211 t/年と推計している。

(2) 航空機からのPM_{2.5}排出

航空機からの排出ガスについては、上層大気への直接的な汚染源として従前より注目されている¹⁴⁾が、地上付近におけるPM_{2.5}発生量としてはそれほど大きくない。しかし、最近では、ICAO (International Civil Aviation Organization : 民間国際航空機構) において、航空機からの不揮発性排出粒子の排出基準を2016年までに導入することが検討されている^{15,16)}。

東京都微小粒子状物質検討会¹³⁾での見積もりによると、平成20年度の関東圏での航空機からのPM_{2.5}排出量は、318 t/年と推計されている。

(3) 鉄道からのPM_{2.5}排出

鉄道からのPM_{2.5}排出としては、線路や架線の摩耗やディーゼル機関車からの排出ガスが発生源として考えられる。東京都微小粒子状物質検討会¹³⁾での見積もりによると、平成20年度の関東圏での鉄道からのPM_{2.5}排出量は、267 t/年と推計されている。

以上をまとめて、Table 1 に示す。

Table 1 PM_{2.5} emissions from mobile sources in Tokyo and Kanto region in 2008 estimated by Tokyo Metropolitan Government Bureau of Environment

		トン/年
自動車	東京都内	848
	関東圏内	5,071
船舶	東京湾内	2,994
	関東圏内	5,211
航空機	羽田空港	140
	成田空港	178
鉄道	東京都内	72
	関東圏内	267

3. ま と め

本稿では、移動発生源からのPM_{2.5}排出傾向として、主に自動車について取り上げた。

自動車排出粒子は、ほとんどがPM_{2.5}からなっており、主な成分は元素状炭素 (EC) である。これらの排出に対する規制は、1990年代以降順次強化されたが、技術発展及び燃料中の硫黄分を低減させることにより、PM排出の少ない車両が順次投入されてきた。道路沿道でのPM_{2.5}濃度にも低下傾向が見られ、規制強化に伴う排出量低減が、大気環境の改善につながっていることが示唆された。

PM_{2.5}に対する直接的な自動車排出の影響は小さくなってきたが、大気中の化学反応を経て生成される二次粒子に対する自動車排出ガスの寄与については、ま

だ分からないことが多いのが現状である。これらを解明するツールとして、大気シミュレーションの活用が大いに期待されるが、PM_{2.5}濃度の再現性向上や入力データとしての排出量推計の精度向上や排出量推計結果の検証など、まだまだ改善の余地が残されており、今後の研究の進展への期待が大きい。また、自動車排出ガスの低減に伴い、排気以外からのPM_{2.5} (たとえば、巻上粉塵やタイヤ・ブレーキ粉塵) の注目が高まっており、今後も検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) 東京都微小粒子状物質検討会：東京都微小粒子状物質検討会報告書 (2011)
- 2) 環境省：PM_{2.5}に関する総合的な取組 (政策パッケージ), <http://www.env.go.jp/air/osen/pm/conf/conf01-06/ref01.pdf> (2013)
- 3) Kittelson, D. B.: Engines and nanoparticles : a review, Journal of Aerosol Science, Vol. 29, pp. 575-588 (1998)
- 4) 環境庁ディーゼル排気微粒子リスク評価検討会：ディーゼル排気微粒子リスク評価検討会平成13年度報告 (2002)
- 5) 萩野浩之, 佐々木左宇介, 中山明美, 中島 徹：ディーゼルエンジンならびにガソリン車両からの有機炭素/元素状炭素の排出量と性状分析, 自動車研究, Vol. 32, No. 12, pp. 705-708 (2010)
- 6) 東京都環境局：大気汚染測定結果ダウンロード, https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/result_measurement.html
- 7) 環境省：微小粒子状物質曝露影響調査報告書 (2007)
- 8) 環境省ホームページ, <http://www.env.go.jp/air/osen/pm/monitoring.html>
- 9) (財)石油エネルギー技術センター：JATOP 技術報告書「将来PM_{2.5}濃度・発生源感度予測」, JPEC-2011AQ-01 (2012)
- 10) Chatani, S., Morikawa, T. and Nakatsuka, S.: Development of a framework for a high-resolution, three-dimensional regional air quality simulation and its application to predicting future air quality over Japan, Atmospheric Environment, vol. 45, pp. 1383-1393 (2011)
- 11) 伊藤晃佳：大気環境学会における最近の研究トピック, JARI Research Journal (2014. 12)
- 12) 海洋政策研究財団 (財団法人シップアンドオーシャン財団)：平成19年度船舶起源の粒子状物質 (PM) の環境影響に関する調査研究報告書 (2008)
- 13) 東京都微小粒子状物質検討会：微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 等排出インベントリ報告書 (2011)
- 14) Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N.: Atmospheric chemistry and physics, John Wiley & Sons (2012)
- 15) Hu, J. and Bhargava, A.: Industry perspective on Fuel and environmental challenges for aviation, 2nd UTIAS-MITACS international workshop on aviation and climate change (2010)
- 16) (社)日本航空宇宙工業会：CAEP SG2013に参加して, 会報「航空と宇宙」, pp. 4-8 (2014. 02)